

На правах рукописи

ФЭН ЦЗИН

**ДЕЙСТВИЕ РЕГУЛЯТОРОВ РОСТА НА ФИЗИОЛОГО-
БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И УРОЖАЙНОСТЬ
ЗЕРНОВОГО АМАРАНТА В ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ И ПРИ
СТРЕССЕ**

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва 2026

Диссертационная работа выполнена в агробиотехнологическом департаменте
Аграрно-технологического института РУДН

Научный руководитель: **Гинс Мурат Сабирович**, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, профессор агробиотехнологического департамента Аграрно-технологического института РУДН

Официальные оппоненты: **Белопухов Сергей Леонидович**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры химии института агробиотехнологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева»

Соколова Диана Викторовна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела генетических ресурсов овощных и бахчевых культур, куратор коллекций свеклы, шпината и амаранта Федерального исследовательского центра «Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I.»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2026 г. в «_____» часов на заседании диссертационного совета ПДС 2021.002 при ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН) по адресу 117198, ул. Миклухо Маклая, д. 8 корп.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке в УНИБЦ (Научной библиотеке) ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН) по адресу: 117198 ул. Миклухо-Маклая, д. 6, и на сайте: <https://www.rudn.ru/science/dissovet>.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
кандидат сельскохозяйственных наук

Е.В. Романова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В условиях обострения ресурсных и экологических ограничений, а также увеличения амплитуды климатических колебаний, развитие устойчивых моделей производства продовольствия на основе инноваций в биологических науках и сельскохозяйственных технологиях, а также интродукция нетрадиционных культур, сочетающих высокую питательную ценность и экологическую адаптивность, имеют важное значение для обеспечения продовольственной безопасности и сохранения здоровья населения (Manyelo et al., 2022; Gomez et al., 2023). Перспективным направлением исследования является внедрение и использование новых зерновых и овощных культур, не получивших широкого распространения, для оптимизации и создания новых продуктов питания и обеспечения населения необходимыми питательными веществами в настоящее время и в долгосрочной перспективе (Manyelo et al., 2022).

В данном контексте питательные псевдозерновые культуры рода амарант (*Amaranthus* spp.), относящиеся к семейству амарантовых (Amaranthaceae), могут рассматриваться в качестве объекта пристального научного внимания (Engelhardt et al., 2023). Этот род примечателен высокими питательными качествами и способностью выдерживать суровые климатические условия, а также устойчивостью к болезням растений. Некоторые виды амаранта считаются сорняками из-за своей высокой адаптивности и выживаемости (Jing et al., 2023; Kouame et al., 2023). Среди зерновых видов рода *Amaranthus* наибольшее значение имеют *A. hypochondriacus* L., *A. cruentus* L. и *A. caudatus* L., отличающиеся высоким содержанием белка и незаменимых аминокислот, полифенолов, минеральных веществ, ненасыщенных жирных кислот и пищевых волокон (Журавель и др., 2012; Fairbanks, 2021). Семена амаранта отличаются низким содержанием глютена, что делает их перспективным сырьем для разработки безглютеновых продуктов и пищевых добавок для людей с непереносимостью глютена (Урубков и др., 2019).

Кроме того, семена амаранта богаты растительным белком высокого качества, скваленом и другими биологически активными компонентами, что обеспечивает его ценность для пищевой и фармацевтической промышленности (Сидорова и др., 2022; He et al., 2002). Листья амаранта используются в качестве источников натуральных пищевых красителей, травяных чаев и соков благодаря содержанию фитопигментов, флавоноидов, антиоксидантов, фенолов и аскорбиновой кислоты (Motyleva et al., 2022). Одомашнивание амаранта составляет около 4000 лет (Engelhardt et al., 2023), а главными регионами выращивания являются Южная Америка. Растения *A. tricolor* L. и *A. hybridus* L. широко употребляются как овощные культуры в Юго-Восточной Азии, Южной Америке и Африке, тогда как *A. hypochondriacus* L., *A. cruentus* L. и *A. caudatus* L. используются преимущественно как зерновые (Engelhardt et al., 2023; Ponnampalnam et al., 2023).

Нехватка воды, вызывающая засуху, является одним из главных факторов, ограничивающих развитие сельскохозяйственных культур и формирующих стрессовые условия для растений в условиях глобального изменения климата. Воздействие засухи вызывает глубокие изменения в биохимических процессах растений (Hasanuzzaman & Tanveer, 2020). Одним из молекулярных индикаторов

водного стресса является ускоренное накопление активных форм кислорода (АФК), что приводит к изменению структуры хлорофилла, уменьшению количества фотосинтетических пигментов, нарушению метаболизма и повреждению клеток (Hernandez et al., 2001; Reddy et al., 2004; Agati & Tattini, 2010; Munne-Bosch et al., 2013; Getko et al., 2019).

В климатических условиях Московского региона экстремально низкие температуры, возникающие после прорастания и появления всходов таких культур, как пшеница, в виде инверсий и поздних весенних заморозков, становятся одной из основных климатических угроз, ограничивающих производство зерновых (Лазарев, 2014; Aslam et al., 2022; Feng et al., 2022). Подавление фотосинтетической эффективности проростков под действием холодового стресса обуславливает замедление их ростовых процессов и развития, что, в свою очередь, приводит к сокращению оптимальных сроков созревания и снижению урожайности культур. Кроме того, воздействие низких температур инициирует увеличение содержания активных форм кислорода и интенсификацию перекисного окисления липидов, что негативно модифицирует течение дыхательных процессов в растительных клетках (Zhou J. et al., 2009; Huang et al., 2013; Mara et al., 2016).

Широко распространенные в растениях первичные и вторичные метаболиты способны активировать и укреплять ферментативные антиоксидантные системы защиты организма, эффективно снижать повреждающее действие абиотических стрессов на структуру и функции клеток, играя тем самым ключевую роль в поддержании нормальной физиологической деятельности клеток. Растительные регуляторы роста, выступая в качестве важных физиологических регуляторных веществ, могут посредством сигнальных путей и механизмов метаболической регуляции направленно индуцировать и стимулировать биосинтез и накопление указанных функциональных метаболитов (Agati & Tattini, 2010; Sami et al., 2019; Gaba et al., 2018). Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о том, что обработка семян с использованием регуляторов роста растений способствует повышению всхожести семян, а также улучшению морфологических и биохимических показателей проростков. Помимо этого, химические мутагены находят применение в селекции зернового амаранта с целью улучшения его хозяйственно ценных признаков и повышения устойчивости к абиотическим стрессам (Cao et al., 2020; Mewar et al., 2020; Ahmad et al., 2020; Vdovenko et al., 2021; Bird, 1983).

Степень разработанности темы. В России на современном этапе получены существенные результаты в области изучения предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур с использованием регуляторов роста и химических мутагенов, при этом важное место занимает комплексная оценка их воздействия с экологических, экономических и агрономических позиций. Методы замачивания семян и их инкрустации продемонстрировали высокую эффективность в повышении всхожести и жизнеспособности посевного материала, особенно при выращивании растений в стрессовых экологических условиях (Иванова, 1987; Астарханова, 2008). Однако в настоящее время системные исследования, посвященные влиянию регуляторов роста, химических мутагенов и агротехнических приемов на формирование урожая, устойчивость к стрессовым факторам и адаптационные возможности зернового амаранта, остаются недостаточно разработанными.

Цель и задачи исследований. Цель работы заключается в изучении особенности адаптации зернового амаранта к холодовому и водному стрессам (засухе) при применении регуляторов роста и химических мутагенов, а также в оценке продуктивности культуры в условиях Московской области.

Для достижения обозначенной цели решали следующие задачи:

1. изучить влияние регуляторов роста на посевные качества семян амаранта и жизнеспособность проростков, выращенных из обработанных семян;
2. оценить влияние регуляторов роста на морфометрические показатели, содержание антиоксидантов и фотосинтетических пигментов, продуктивность в процессе вегетации растений в условиях открытого грунта;
3. изучить влияние предпосевной обработки семян амаранта на ростовые процессы и содержание фотосинтетических пигментов в условиях водного дефицита и низких положительных температур;
4. оценить действие химических мутагенов на рост и продуктивность мутантных форм амаранта первого, второго и третьего поколения.

Объекты исследования — зерновой амарант (*Amaranthus hypochondriacus* L.) сорта Кизлярец.

Предмет исследования — адаптация амаранта к холодовому и засушливому стрессу под действием регуляторов роста и мутагенов.

Материалы исследования. Материалом исследований служили регуляторы роста: гиббереллиновая кислота (ГК); янтарная кислота (ЯК); салициловая кислота (СК); аскорбиновая кислота (АК); пероксид водорода (H_2O_2); хлорид кальция ($CaCl_2$), 3000; Альбит; и химические мутагены: этилметансульфонат (ЭМС); диметилсульфат (ДМС); диэтилсульфат (ДЭС).

Методология и методы исследований. Исследование включало лабораторные и полевые эксперименты, проведённые с использованием современных научно-технических подходов к планированию и организации опытов. Все наблюдения и учёты выполнялись в соответствии с общепринятыми агрономическими и физиологическими методиками.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые проведена комплексная оценка действия регуляторов роста и химических мутагенов на рост, физиолого-биохимические показатели и продуктивность зернового амаранта в условиях Московской области. Впервые выявлены регуляторы (аскорбиновая кислота, янтарная кислота, гиббереллиновая кислота, хлорид кальция и Альбит), обеспечивающие адаптацию проростков к холодовому и засушливому стрессам, и прослежено их влияние на фотосинтетические пигменты и антиоксиданты в динамике вегетации. Впервые показана эффективность химического мутагенеза (этилметансульфонат, диметилсульфат, диэтилсульфат) для получения мутантных форм с повышенной биомассой, урожайностью и содержанием каротиноидов, что создаёт основу для селекции новых сортов амаранта.

Теоретическая и практическая ценность работы. Теоретическая значимость исследования заключается в расширении научных знаний о физиолого-биохимических механизмах адаптации зернового амаранта (*A. hypochondriacus* L.) к абиотическим стрессам (холодовому и засухе) при применении предпосевной обработки семян регуляторами роста и химическими мутагенами. Полученные данные

вносят вклад в понимание роли экзогенных регуляторов и мутагенеза в формировании стрессоустойчивости нетрадиционных культур в условиях умеренного климата.

Практическая ценность работы состоит в разработке и обосновании оптимальных режимов предпосевной обработки семян, включая подбор эффективных концентраций регуляторов роста, способствующих повышению продуктивности и устойчивости амаранта в условиях Московской области. Результаты исследования могут быть использованы при совершенствовании агротехнологий выращивания зернового амаранта, а также в селекционных программах, направленных на создание высокоурожайных и стрессоустойчивых форм на основе химического мутагенеза зародышевой плазмы тропических генотипов. Это открывает перспективы для интродукции и эффективного использования генетического потенциала амаранта в российском растениеводстве, особенно в контексте адаптации к изменяющимся климатическим условиям.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Эффективность применения регуляторов роста при выращивании семенного амаранта в Московской области.

- Влияние предпосевной обработки семян на биомассу, содержание антиоксидантов, фотосинтетических пигментов и урожайность семян амаранта.

- Эффективность применения регуляторов роста при предпосевной обработке семян амаранта в условиях низкой температуры и засухи.

- Влияние предпосевной обработки семян химическими мутагенами на генетическую стабильность и морфометрические показатели мутантов амаранта первого-третьего поколения.

Степень достоверности результатов исследований подтверждается экспериментальными данными, полученными в результате лабораторных и полевых опытов с использованием методов дисперсионного анализа результатов лабораторных и полевых опытов и положительными результатами внедрения в производственных условиях.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследований, выборе методик проведения полевых опытов, разработке схем, подготовке программы проведения исследований и выполнения агрохимических исследований, проведении лабораторных и полевых испытаний, обработке и анализе результатов исследований, подготовке публикаций, диссертационной рукописи и автореферата.

Апробация и публикации результаты исследований. Основные положения диссертационной работы доложены и опубликованы в материалах XIV Международной научно-практической конференции «Инновационные процессы в сельском хозяйстве» (Москва, 2022); Республиканской научно-практической конференции (с международным участием) «Биоразнообразие экосистем Бассейна Днестра» (Тирасполь, 2022); Научных трудов международной научно-практической конференции «Приоритетные научные исследования в области производства и переработки плодоовощного сырья и винограда» (Махачкала, 2023); Международной научно-практической конференции «Ароматические, лекарственные и овощные растения: интродукция, селекция, агротехника, биологически активные вещества, влияние на человека» (Ялта, 2023).

По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе, 5 работ в изданиях,

индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 287 отечественных и зарубежных источников, приложений. Объем работы составляет 154 страниц, включает 8 таблиц, 39 рисунков и 2 приложения.

Благодарности. Автор благодарен доктору биологических наук, профессору главному научному сотруднику ФГБНУ ФНЦ овощеводства Валентине Карловне Гинс за методическую помощь и научные консультации при выполнении экспериментальных исследований и написании диссертации и автореферата, кандидату биологических наук, старшему научному сотруднику ФГБНУ ФНЦ овощеводства Анне Владимировне Широковой за методическую помощь и рекомендации по методике эксперимента и его концепции на начальном этапе исследования, и доктору биологических наук, профессору заведующему Международного объединенного исследовательского центра пищевых и медицинских наук провинции Шэньси, Шэньсийского педагогического университета Хуафэну Чжану за помощь в процессе публикации статей.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведения исследования, сформулированы цели и задачи, обозначены основные положения, выносимые на защиту, охарактеризована научная новизна и практическая значимость исследования.

В первой главе представлен аналитический обзор современных научных данных, посвящённых агроэкологическим аспектам возделывания зерновых и псевдозерновых культур, в том числе зернового амаранта. Описаны происхождение, история культивирования и хозяйственное значение амарантовых культур, а также их потенциал как источника высококачественного белка, незаменимых аминокислот, антиоксидантов и других биологически активных соединений. Проанализированы современные подходы к повышению урожайности и скороспелости злаковых и псевдозлаковых культур в условиях изменяющегося климата. Охарактеризовано влияние абиотических стрессов, прежде всего засухи и низких температур, на рост, развитие, морфологию и генетическую стабильность растений. Отдельное внимание уделено использованию регуляторов роста и химических мутагенов как инструментов модуляции физиолого-биохимических процессов, повышения стрессоустойчивости и расширения генетического разнообразия зерновых культур, включая амарант.

Во второй главе описаны объекты исследования, включая характеристику сорта зернового амаранта, применявшихся регуляторов роста и химических мутагенов. Представлены климатические и почвенные условия опытного участка в Московской области, а также подробно изложены методики лабораторных и полевых экспериментов.

Исследования были проведены в период с 2021 по 2024 год в чашках Петри, рассадных кассетах, а также на опытных участках защищённого и открытого грунта на базе лаборатории физиологии и биохимии растений, лаборатории интродукции и функциональных продуктов Федерального научного центра овощеводства (ФГБНУ ФНЦО, Одинцовский район, Московская область) и Агробиотехнологического департамента Аграрно-технологического института (АТИ) Российского университета дружбы народов Им. Патриса Лумумбы (РУДН).

Почвы опытных участков дерново-подзолистые, тяжелосуглинистые, с предельной полевой влагоемкостью 38–45% и содержанием гумуса 2,5–3,2%. Реакция среды слабокислая, близкая к нейтральной (рН 5,1–6,0), отмечено среднее и повышенное содержание подвижного фосфора и обменного калия, кальция и магния. Одинцовский район относится к тёплой агроклиматической зоне с холодной зимой, жарким летом и достаточными запасами тепла и влаги для выращивания широкого спектра сельскохозяйственных культур.

В целом, во все годы полевого опыта метеорологические условия в годы проведения полевых исследований достаточно сильно не различались. Вегетационный период 2021 и 2022 года характеризовался повышенными температурами воздуха и увеличением количества осадков, что положительно повлияло на урожай зернового амаранта. Вегетационный период 2023 года характеризуется нормальной температурой и отсутствием осадков. В то же время вегетационный период 2024 года характеризуется высокой температурой и умеренным количеством осадков. В связи с этим в ходе полевых испытаний в 2023 и 2024 годах был проведен дополнительный полив и регулирование влажности для поддержания оптимальных условий роста.

Таким образом, климатические условия в 2021–2024 годах были благоприятны для роста и развития зернового амаранта.

Объектом исследования являлись семена зернового амаранта сорта Кизлярец, зарегистрированного в Государственном реестре селекционных достижений Российской Федерации в 1998 году. Семена были получены из лаборатории физиологии, биохимии, интродукции и функциональных продуктов Федерального научного центра овощеводства (ФГБНУ ФНЦО, Российская Федерация).

В качестве предпосевной обработки семян были использованы регуляторы роста растений: дистиллированная вода, ГК, ЯК, СК, АК, H_2O_2 , $CaCl_2$ и Альбит.

Методика лабораторных исследований в 2021–2024 гг. включала предпосевную обработку семян зернового амаранта сорта Кизлярец водными растворами регуляторов роста с последующей оценкой прорастания и раннего этапа роста. Семена замачивали на 4–6 ч при 23–25 °С в дистиллированной воде (контроль) или растворах: H_2O_2 (5–50 ммоль/л), $CaCl_2$ (1110 и 3000 мг/л), ГК (300 мг/л), АК (60 и 88 мг/л), ЯК (300 и 500 мг/л), СК (6,9; 69 и 138 мг/л), «Альбит» (1 г/л). После подсушивания семена проращивали по 50 шт. на фильтровальной бумаге в чашках Петри при 23 °С. Ежедневно в течение 7 суток рассчитывали потенциал прорастания (ПП, %), скорость прорастания (СП, %), среднее время прорастания (СВП, сут), индекс всхожести (ИВ, %·сут⁻¹), индекс энергии семян (ИЭС, мг·%·сут⁻¹) и индекс жизнеспособности (ИЖ) по формулам Perry (1978), Ren (2004), Niu et al. (2013), Li et al. (2016), Yao et al. (2021). На 7-е сутки измеряли длину гипокотилия и корешка (см), сырую и сухую массу проростков (г).

Для моделирования холодового стресса использовали циклы охлаждения проростков в чашках Петри (4–10 °С, начиная с 3-го дня проращивания), а в горшечных опытах засуху индуцировали снижением полива с 20-го дня и далее оценивали засухоустойчивость растений по морфологическим и биохимическим показателям.

Биохимический анализ включал определение хлорофиллов а, b и каротиноидов в этанольных экстрактах (0,2 г листьев) спектрофотометрически при 665, 649 и 470 нм (Lichtenthaler & Wellburn, 1983; Гинс и др., 2010), с пересчётом к сухой массе и выражением каротиноидов в эквиваленте виолаксантина (Jaiswal & Abu-Ghannam, 2012). Аскорбиновую кислоту определяли йодометрически после экстракции 1% HCl и щавелевой кислотой (Сапожникова и Дорофеева, 1996; Kaur & Karoor, 2002). Суммарные спирторастворимые антиоксиданты анализировали на Цвет-Яуза-01-АА в 96% этаноле после центрифугирования (10 000 g, 15 мин) по Яшину и др. (2006) и Гинсу и др. (2013). Содержание амарантина в водных экстрактах листьев определяли спектрофотометрически с молярным коэффициентом экстинкции $5,66 \cdot 10^4$ л·моль⁻¹·см⁻¹ и молекулярной массой 726,6 г·моль⁻¹ (Гинс и др., 2016).

Методика полевых исследований в 2021–2024 гг. включала возделывание зернового амаранта сорта Кизлярец в открытом грунте на опытно-производственной базе ФГБНУ ФНЦО. Посев проводили вручную линейным способом 2 июня при средней суточной температуре около 20 °С; площадь учётной делянки составляла 6 м², глубина заделки семян 1,5 см, норма высева 0,6 г/м², трёхкратная повторность.

Варианты предпосевной обработки семян регуляторами роста и их нормы применения представлены в таблице 1. Семена замачивали в растворах при 25 °С в

течение 8 ч, затем промывали, подсушивали и высевали; далее учитывали всхожесть, морфологические и биохимические показатели в четырёх фазах роста, а также урожаем через 100 суток (Kaczmarek et al., 2017; Li et al., 2017).

Предпосевная обработка семян амаранта сорта Кизлярец (всхожесть ~99%, 100 семян на вариант) осуществлялась с использованием химических мутагенов в рабочих концентрациях: этилметансульфонат (ЭМС) — 0,03; 0,06 и 0,08 мг/мл, диметил-сульфат (ДМС) — 0,08 мг/мл, диэтилсульфат (ДЭС) — 0,05 мг/мл.

Обработка выполнялась по методике Института химической физики им. Н.Н. Семенова (к.б.н. Широковой А.В.) в герметичных пробирках при температуре 25°C в течение 16 ч (Shirokova et al., 2020). После обработки семена подвергались трёхкратной промывке дистиллированной водой (в общей сложности в течение 2 ч), что обусловлено возможностью распада указанных мутагенов при комнатной температуре за 12 ч и обеспечило безопасность для исследователей и окружающей среды (согласно исследованиям ИФХ 1960–1980-х гг. под руководством И.А. Рапопорта). После промывки семена высевались на опытные деланки в установленном режиме агротехники для оценки их влияния на рост, развитие и продуктивность растений.

Концентрация этих веществ была определена в ходе предварительных экспериментов, как подробно описано в таблице 1 (Таблица 1). Семена зернового амаранта равномерно раскладывали в чашках Петри и замачивали в разных контейнерах для проращивания в растворах, содержащих различные регуляторы роста растений, и обрабатывали при температуре 25°C и в темноте в течение 8 ч.

Таблица 1. Варианты обработки семян в 2021–2024 гг.

Номер	Обработка	Сокращенное название	нормы применения (мг/л)
1	Без замачивания	Контроль	-
2	Дистиллированная вода	Контроль с H ₂ O	-
3	Гиббереллиновая кислота	ГК	300
4	Янтарная кислота	ЯК	300
5	Салициловая кислота	СК	69
6	Аскорбиновая кислота	АК	60
7	Пероксид водорода	H ₂ O ₂	170,05
8	Хлорид кальция	CaCl ₂	3000
9	Альбит	Альбит	1000

В ходе эксперимента отмечали фенологические фазы и отбирали листья в четырёх фазах для анализа фотосинтетических пигментов. Учёты и наблюдения выполняли по методикам госсортоиспытания и ГОСТам (4671-78, 12038-84, 10220-98), а также по рекомендациям Доспехова (1985), Мироненко и др. (1990), Кононкова и др. (1997; 1999; 2008). Оценивали комплекс морфологических и продуктивных параметров мутантов М₁–М₃: всхожесть и выживаемость, высоту, толщину стебля, длину соцветий, число листьев и боковых побегов, площадь листьев, массу листьев, стебля и общей надземной биомассы на стадии созревания. Дополнительно определяли массу семян с метёлки, массу 1000 семян и урожайность (г/м²), что позволило проследить наследование мутационно изменённых признаков и выделить линии с устойчивым повышением продуктивности, одновременно проводя

визуальный фенотипический скрининг на антоциановую пигментацию, изменения формы и окраски листьев и соцветий, особенности ветвления и габитуса растения.

Статистическую обработку данных проводили по методике Доспехова (1985) и Wang et al. (2023) с использованием MS Excel. Результаты полевых опытов представлены как среднее значение \pm SD. Достоверность различий между вариантами оценивали по критерию НСР с применением трёхфакторного дисперсионного анализа (ANOVA) при $p < 0,05$ (множественный тест Дункана).

В третьей главе представлены результаты и обсуждение комплексных исследований по влиянию регуляторов роста и химических мутагенов на рост, развитие, физиолого-биохимические показатели и урожайность зернового амаранта в различных условиях внешней среды в 2021–2024 годах.

На основе фенологических наблюдений, проведённых в 2021–2024 гг. в Московской области, установлено, что вегетационный период зернового амаранта сорта Кизлярец продолжался 100–140 дней и включал четыре чётко выраженные фазы: всходы (15–20 дней после посева), бутонизация (45–50 дней), цветение с началом формирования семян (60–70 дней) и созревание (25–30 дней).

В лабораторных и полевых условиях предпосевная обработка семян зернового амаранта сорта Кизлярец регуляторами роста оказала достоверное влияние на морфологические показатели проростков. На 5-е и 7-е сутки прорастания отмечено значительное стимулирующее действие оптимальных концентраций: H_2O_2 (5 ммоль/л), гибберелловой кислоты (ГК, 300 мг/л), аскорбиновой кислоты (АК, 60 мг/л), янтарной кислоты (ЯК, 300 мг/л), $CaCl_2$ (3000 мг/л), салициловой кислоты (СК, 6,9 мг/л) и препарата Альбит (1 г/л). Эти обработки увеличивали длину гипокотилия на 11–85 % и длину корня на 6,7–66,7 % по сравнению с контролем, причём максимальный эффект на корневую систему дала ЯК (+66,7 %). Высокие концентрации СК (69–138 мг/л) и АК (88 мг/л) проявляли ингибирующее действие, подавляя рост проростков. Все эффективные обработки также обеспечивали максимальную всхожесть (до 100 %) и ускоренное прорастание. Таким образом, в лабораторных условиях установлены оптимальные дозы регуляторов, способствующие интенсивному развитию как надземной, так и подземной частей проростков.

Содержание аскорбиновой кислоты и фотосинтетических пигментов является ключевым индикатором функционального состояния антиоксидантной и фотосинтетической систем растений, особенно в условиях действия регуляторов роста и абиотических стрессов. L-аскорбиновая кислота (витамин С) выполняет центральную роль в нейтрализации активных форм кислорода и поддержании редокс-статуса клеток, тогда как хлорофиллы и каротиноиды определяют эффективность поглощения и преобразования световой энергии. Для зернового амаранта, рассматриваемого как перспективная высоковитаминная и антиоксидантно богатая культура, изучение динамики этих компонентов под влиянием предпосевной обработки регуляторами роста позволяет оценить потенциал целенаправленного повышения пищевой и функциональной ценности биомассы

Содержание аскорбиновой кислоты в листьях зернового амаранта существенно возрастало под влиянием ряда регуляторов роста, особенно в фазу бутонизации. В этот период обработки ГК, ЯК, СК, АК, H_2O_2 , $CaCl_2$ и Альбитом увеличивали уровень аскорбиновой кислоты по сравнению с контролем на 34,17%, 29,11%, 17,09%, 19,63%,

37,34%, 22,15% и 40,51% соответственно. На стадии цветения ЯК, АК и Альбит повышали содержание аскорбиновой кислоты на 6,5–9,35%, а на стадии созревания ЯК, АК, H₂O₂ и CaCl₂ на 3,08–50% по сравнению с контролем (Рисунок 1).

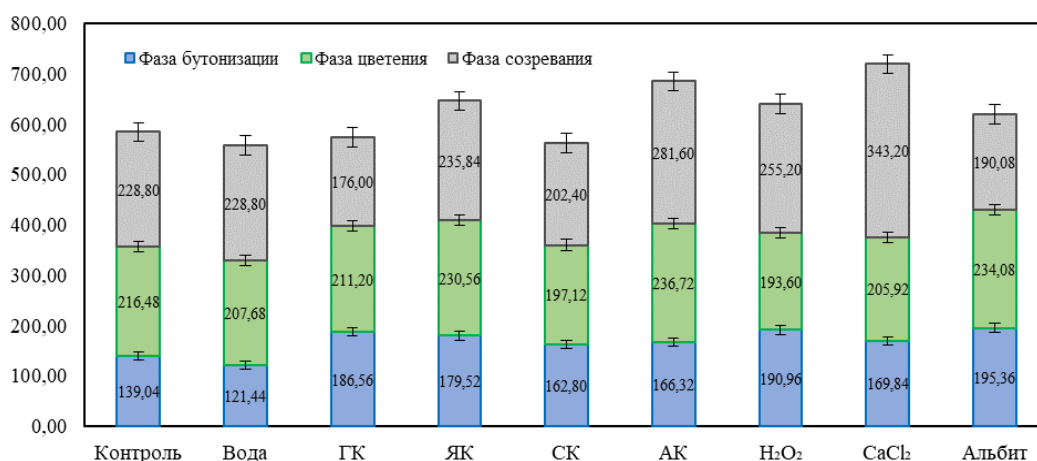


Рисунок 1. Влияние регуляторов роста на содержание аскорбиновой кислоты в листьях зернового амаранта, среднее за 2021-2024 годы, мг/г%.

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях зернового амаранта существенно варьировало под влиянием регуляторов роста на разных стадиях онтогенеза. Максимальные значения хлорофиллов регистрировали в фазу бутонизации, после чего их уровень сохранялся в фазу цветения и снижался к созреванию. В фазу бутонизации обработки ГК, ЯК, СК, АК, H₂O₂, CaCl₂ и Альбитом повышали содержание хлорофилла а на 0,21–4,98% по сравнению с контролем, причём наибольший прирост наблюдался при применении H₂O₂ (+4,98%), ГК (+4,47%) и Альбита (+3,63%) (Рисунок 2).

Содержание хлорофилла b в фазу бутонизации возрастало ещё более выражено: при обработке ЯК, СК, АК, H₂O₂, CaCl₂ и Альбитом оно превышало контроль на 38,25–68,65%, тогда как дистиллированная вода и ГК на этой стадии не давали прироста относительно контроля. На стадиях цветения и созревания уровень хлорофилла b у всех вариантов с регуляторами роста, включая воду, оставался выше контроля, а максимальные значения отмечены при обработке ГК: +49,07% (цветение) и +82,35% (созревание). Полученные результаты указывают, что предпосевная обработка ГК, ЯК, АК, H₂O₂, CaCl₂ и Альбитом поддерживает повышенное содержание хлорофиллов и, соответственно, фотосинтетический потенциал растений, особенно в поздние фазы онтогенеза (Рисунок 2).

Анализ данных за 2021–2024 гг. показал, что эффективность регуляторов роста в отношении урожайности зерна зернового амаранта существенно зависела как от типа препарата, так и от погодно-климатических условий вегетационного периода.

В 2021 г. предпосевная обработка семян перекисью водорода (H₂O₂) привела к снижению урожайности на 2,3 % относительно контроля. В то же время обработка дистиллированной водой, гиббереллиновой кислотой (ГК), янтарной (ЯК), салициловой (СК), аскорбиновой (АК) кислотами, хлоридом кальция (CaCl₂) и препаратом Альбит повысила урожайность соответственно на 2,3 %, 29,31 %, 12,33 %, 11,84 %, 44,41 %, 43,12 % и 26,17 %.

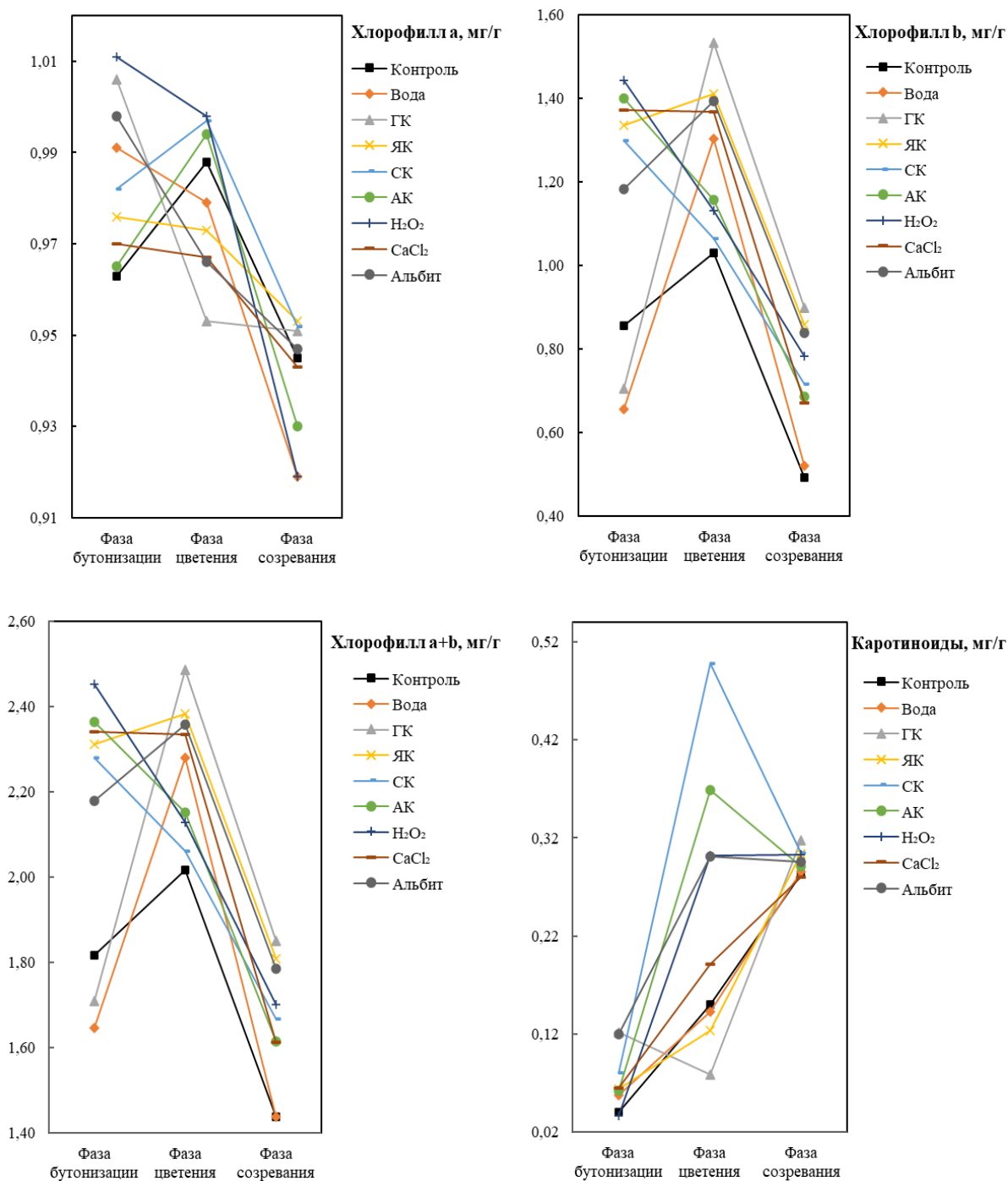


Рисунок 2. Влияние регуляторов роста на содержание фотосинтетических пигментов зернового амаранта, среднее за 2021-2024 годы, мг/г

В 2022 г. наблюдалась аналогичная тенденция: урожайность в варианте H₂O₂ была ниже контроля на 7,85 %, тогда как применение GK, YK, SK, AK, CaCl₂ и Альбита обеспечило прирост урожайности на 31,23 %, 10,51 %, 8,85 %, 35,93 %, 37,59 % и 30,79 % соответственно. Обработка дистиллированной водой не оказала достоверного влияния на урожайность.

В 2023 г. погодные условия в Московской области характеризовались высокой температурой и дефицитом осадков. Тем не менее, благодаря регулярному поливу (раз в три дня) были созданы благоприятные условия для развития зернового амаранта, культуры, требовательной к теплу и свету. В результате урожайность во всех вариантах, включая контроль, оказалась выше, чем в 2021 и 2022 гг. Наибольший

прирост урожайности относительно контроля обеспечили АК (+36,53 %), CaCl₂ (+29,89 %), ГК (+24,78 %) и Альбит (+24,90 %). При этом обработка дистиллированной водой и H₂O₂ привела к снижению урожайности по сравнению с контролем (Таблица 2).

В 2024 г. по сравнению с контролем (325,60 г/м²) урожайность снизилась при обработке H₂O₂ (318,28 г/м²), не изменилась при обработке H₂O (325,52 г/м²) и возросла при применении ГК, ЯК, СК, АК, CaCl₂ и Альбита на 34,57 %, 17,46 %, 13,33 %, 42,61 %, 41,74 % и 35,21 % соответственно (Таблица 2).

Таблица 2. Влияние регуляторов роста на урожайность зерна зернового амаранта, г/кв.м.

Обработка	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.	Среднее
Контроль	348,00±35,08g	330,00±58,00d	391,50±23,35f	325,60±31,87e	348,78±42,72d
Вода	356,20±33,06f	328,07±54,67d	373,00±43,07g	325,52±20,85e	345,70±27,30d
ГК	450,24±32,07c	433,07±41,87b	488,50±38,25c	438,15±18,90b	452,49±36,01b
ЯК	390,90±35,75e	364,67±49,47c	410,00±39,70e	382,45±25,67c	387,01±22,99c
СК	389,20±26,74e	359,20±22,00c	435,25±30,50d	369,00±26,52d	388,16±47,09c
АК	502,55±35,65a	448,57±22,50a	534,50±24,53a	464,35±16,84a	487,49±47,01a
H ₂ O ₂	340,08±25,80h	304,00±14,40e	361,00±25,60h	318,28±37,25f	330,84±30,16e
CaCl ₂	498,05±38,75b	454,05±45,60a	508,50±48,75b	461,50±15,55a	480,53±27,97a
Альбит	439,06±35,04d	431,60±80,40b	489,00±50,75c	440,26±25,69b	449,98±39,02b

Примечание. Различия значимы при $p < 0,05$ (тест Дункана). Значения — среднее±SD ($n=3$).

Средние значения за четырёхлетний период свидетельствуют, что наиболее эффективными препаратами для повышения урожайности зерна амаранта являются аскорбиновая кислота (АК, +39,7 % к контролю), хлорид кальция (CaCl₂, +37,8 %) и Альбит (+29,2 %). Напротив, обработка перекисью водорода (H₂O₂) систематически снижала урожайность на протяжении всего эксперимента. Полученные результаты подтверждают, что физиологическая реакция амаранта на регуляторы роста зависит от фазы развития растений и внешних условий, в первую очередь от температуры и влажности. Следовательно, для достижения максимальной эффективности необходимо адаптировать выбор препарата и его концентрацию к конкретным агроклиматическим условиям. В целом, рациональное применение регуляторов роста позволяет достоверно повысить урожайность зерна зернового амаранта даже в условиях умеренно континентального климата Центральной России (Таблица 2).

В условиях низкотемпературного стресса (10 °С) предпосевная обработка семян зернового амаранта регуляторами роста достоверно повышала его адаптационный потенциал. Наиболее эффективными оказались янтарная кислота (ЯК) и хлорид кальция (CaCl₂), которые в условиях холода увеличивали индекс всхожести на 26,6 % и 14,5 %, индекс жизнеспособности на 18,2 % и 14,5 %, а также сокращали среднее время прорастания. ЯК обеспечивала максимальный прирост сухой массы проростков на 78,9 % при 10 °С. Перекись водорода в низкой концентрации (10 ммоль/л) слабо стимулировала прорастание, тогда как высокая (50 ммоль/л) и салициловая кислота в ряде случаев снижали vigor семян. Таким образом, ЯК и CaCl₂ проявили себя как наиболее перспективные препараты для повышения холодоустойчивости амаранта на ранних этапах онтогенеза.

Морфологические показатели свидетельствуют, что предпосевная обработка

семян заметно улучшала рост проростков амаранта как при 23 °С, так и при 10 °С (Рисунок 3).

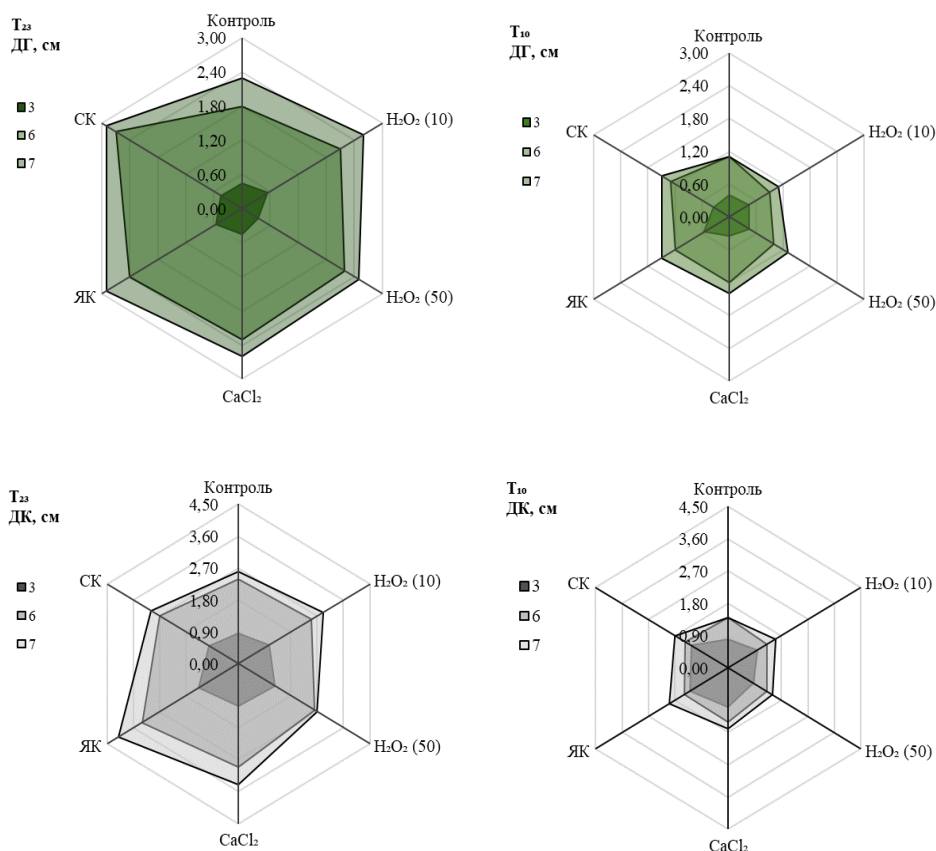


Рисунок 3. Влияние регуляторов роста растений на биомассу зернового амаранта при низкотемпературной стимуляции. Приведены средние значения длины гипокотиля (ДГ) и длины корня (ДК) в третий, шестой и седьмой дни прорастания.

Примечание: Данные — среднее ± SD (n = 3). Достоверность различий между обработками оценена трёхфакторным ANOVA при p < 0,05.

К седьмому дню при нормальной температуре H₂O₂ (10 и 50 ммоль/л), CaCl₂, янтарная и салициловая кислоты увеличивали длину гипокотиля на 16,7–50,0% и корешка на 4,2–37,5% по сравнению с контролем, что отражает усиленное формирование как надземной, так и корневой систем. При охлаждении (10 °С) прирост ДГ и ДК также сохранялся во всех вариантах, подтверждая высокую адаптивную способность проростков к низким положительным температурам и эффективность регуляторов роста как средств индукции холодоустойчивости. Наиболее выразительно стимулировали удлинение гипокотиля салициловая и янтарная кислоты, тогда как для развития корней особое значение имели янтарная кислота и CaCl₂, что согласуется с их ролью в регуляции метаболизма и кальций-зависимых сигнальных путей (Рисунок 3).

Влияние предпосевной обработки на формирование антиоксидантной системы проростков амаранта оценивали по показателям прорастания, росту и содержанию пигментов и антиоксидантов при 25 °С и при циклическом холодовом стрессе 4 °С. Обработка ГК, ЯК, H₂O₂ и CaCl₂ при оптимальной температуре повышала потенциал и скорость прорастания, индекс всхожести, индекс жизнеспособности и индекс энергии семян. Наиболее эффективными оказались ГК и ЯК, увеличивавшие ПП на 6,3–6,5%, ИВ на 19,6–20,1%, ИЖ на 64–87%. В условиях 4 °С достоверный рост ИВ

(на 9,8–15,1%) и ИЖ (на 45,8–59,8%) сохранялся преимущественно для ГК и ЯК, что сопровождалось улучшением морфологических характеристик (длина гипокотилия и корня, биомасса проростков) и повышением содержания фотосинтетических пигментов и общих антиоксидантов, свидетельствуя об активации защитных механизмов и ослаблении окислительного стресса (Таблица 4).

Таблица 4. Влияние стимуляторов роста на всхожесть семян зернового амаранта в оптимальных и низкотемпературных условиях

Обработка стимуляторами роста	Температурная обработка	ПП (%)	СП (%)	ВП (дни)	ИВ	ИЖ	ИЖ
Контроль	T ₂₅	93±0,050c	94±0,050c	2,17±0,025c	45,42±0,050d	94,02±0,005h	4,90±0,030b
	T ₄	94±0,050c	95±0,050b	2,14±0,060c	46,75±0,050d	79,01±0,050j	4,77±0,050d
ГК	T ₂₅	99±0,000a	99±0,000a	1,91±0,035e	54,33±0,050a	176,03±0,005a	7,03±0,040b
	T ₄	98±0,050a	98±0,050a	1,96±0,080d	51,33±0,050b	126,27±0,030d	5,69±0,020d
СК	T ₂₅	96±0,050b	98±0,050a	2,40±0,030b	43,00±0,050e	86,00±0,005i	3,31±0,040b
	T ₄	96±0,050b	97±0,050a	2,27±0,000b	44,25±0,050e	66,38±0,040k	3,37±0,040c
ЯК	T ₂₅	99±0,050a	100±0,050a	1,94±0,035e	54,53±0,050a	154,24±0,005b	7,09±0,035a
	T ₄	97±0,050a	97±0,050a	1,90±0,070e	53,83±0,050a	115,20±0,030f	6,00±0,090c
H ₂ O ₂	T ₂₅	96±0,050b	96±0,050b	2,02±0,040d	49,00±0,050c	138,18±0,010c	5,39±0,050b
	T ₄	93±0,050c	94±0,050c	2,00±0,060d	49,20±0,050c	96,43±0,030h	3,98±0,030e
CaCl ₂	T ₂₅	95±0,050b	96±0,050b	1,91±0,010e	53,92±0,050a	121,33±0,030e	6,89±0,010
	T ₄	93±0,050c	98±0,050a	2,06±0,020d	51,85±0,050b	106,81±0,010g	4,68±0,050

Примечание: Приведены средние значения ПП, СП, ВП, ИВ, ИЖ и ИЭС (среднее ± SD из 3 повторов). Обработки с разными буквами значительно различаются (тест Дункана, $p < 0,05$). Различия между обработками по трехфакторному ANOVA.

Учет биомассы и морфологические показатели показали, что предпосевная обработка заметно усиливает рост проростков амаранта при 25 °С и 4 °С. В нормальных условиях ЯК, ГК, CaCl₂ и H₂O₂ увеличивали долю корневой массы и способствовали более интенсивному удлинению гипокотилия и корней по сравнению с контролем, причём максимальный эффект отмечен для ГК и ЯК. В условиях охлаждения прирост длины и биомассы снижался, но обработка ГК, ЯК, H₂O₂ и CaCl₂ всё же обеспечивала значимое преимущество над контролем, что указывает на поддержание роста и более эффективное развитие корневой системы при низких температурах.

Проанализировано влияние предпосевной обработки семян перекисью водорода, аскорбиновой и янтарной кислотами на морфологические параметры, фотосинтетические пигменты и содержание амарантина и аскорбиновой кислоты у амаранта сорта Кизлярец в норме и при засухе. В благоприятных условиях все три обработки достоверно улучшали рост по сравнению с контролем: высота растений увеличилась на 67,92, 82,08 и 102,53%, площадь листовой поверхности на 93,28, 21,81

и 27,36%, количество листьев на 34,30, 18,74 и 15,56%, масса надземной части на 324,47, 101,82 и 177,63% для перекиси водорода, аскорбиновой и янтарной кислот соответственно (Рисунки 4, 5).



Рисунок 4. Общий вид 40-дневных контрольных растений *Amaranthus hypochondriacus* L. сорта Кизлярец и предпосевной обработки в нормальных (два горшка слева) и засушливых (два горшка справа) условиях (А: контроль; В: перекись водорода; С: аскорбиновая кислота; D: янтарная кислота).

При этом у варианта H_2O_2 наблюдались наибольшие значения площади листьев, числа листьев и биомассы, а также повышенное содержание хлорофилла, амарантина и аскорбиновой кислоты в листьях по сравнению с контролем. После 20-дневного засушливого стресса у контроля засухи высота растений уменьшилась на 26,92%, площадь листьев на 47,51%, количество листьев на 12,56%, масса надземной части на 28,66% относительно контроля в норме (Рисунок 5).

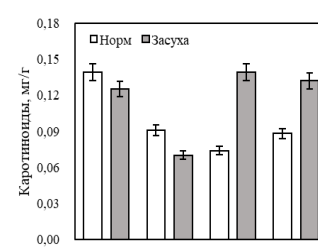
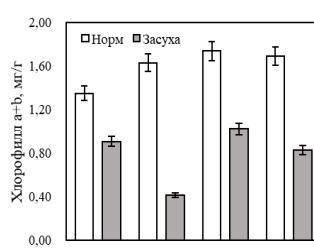
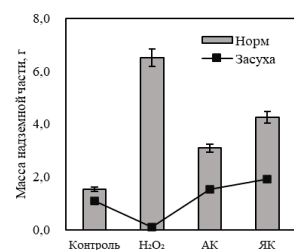
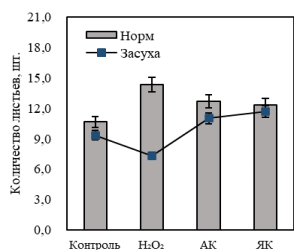
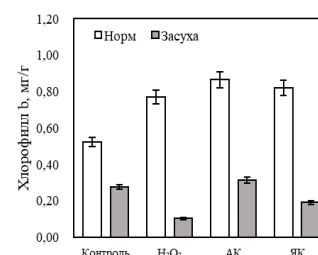
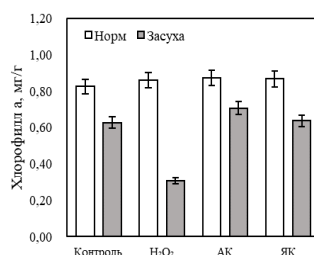
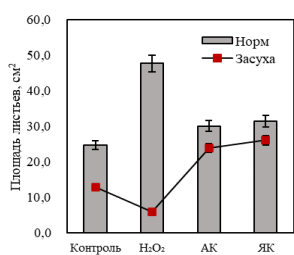
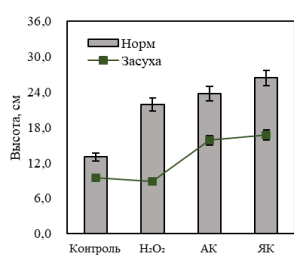


Рисунок 5. Влияние предварительной обработки различными препаратами на биомассы растения амаранта при норме и засухе

Рисунок 6. Влияние предварительной обработки различными препаратами на содержание фотосинтетических пигментов в растениях амаранта при норме и засухе

В условиях засухи у варианта с перекисью водорода снижение по сравнению с контролем при засухе составило 7,05% по высоте, 53,74% по площади листьев, 21,44% по числу листьев и 90,11% по массе надземной части, а содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях было примерно в 2 раза ниже контроля, несмотря на несколько более высокий уровень амарантина и аскорбиновой кислоты. Напротив, предпосевная обработка аскорбиновой и янтарной кислотами при засухе обеспечила увеличение высоты растений на 66,63 и 75,47%, площади листьев на 84,81 и 101,54%, количества листьев на 17,90 и 25,08%, массы надземной части на 40,97 и 75,18% по сравнению с

контролем засухи, одновременно повышая содержание хлорофилла а, хлорофилла в и каротиноидов (для аскорбиновой кислоты на 12,42, 13,72 и 11,20% соответственно относительно контроля) (Рисунок 6). Таким образом, перекись водорода эффективна как стимулятор роста в норме, но не защищает от засухи, тогда как аскорбиновая и янтарная кислоты способствуют сохранению биомассы и фотосинтетического аппарата и формируют засухоустойчивость амаранта.

Таблица 4. Влияние химических мутагенов на характеристики прорастания семян зернового амаранта (первое поколение М1).

Обработка	Контроль	ЭМС 0,03 мг/мл	ЭМС 0,06 мг/мл	ЭМС 0,08 мг/мл	ДМС 0,08 мг/мл	ДЭС 0,05 мг/мл
ПП (%)	88,25±2,50	33±2,50	40±2,50	28±2,50	7±2,50	20±2,50
СП (%)	92,00±1,25	50±2,50	74±2,50	47±2,50	27±2,50	49±2,50

Амарантин и аскорбиновая кислота играют важную роль в антиоксидантной защите амаранта и его адаптации к засухе. Предпосевная обработка семян перекисью водорода, аскорбиновой и янтарной кислотами усиливала накопление этих соединений в листьях, особенно в условиях водного дефицита. Повышение содержания амарантина и аскорбиновой кислоты способствует снижению окислительного стресса и рассматривается как один из механизмов формирования засухоустойчивости у амаранта.

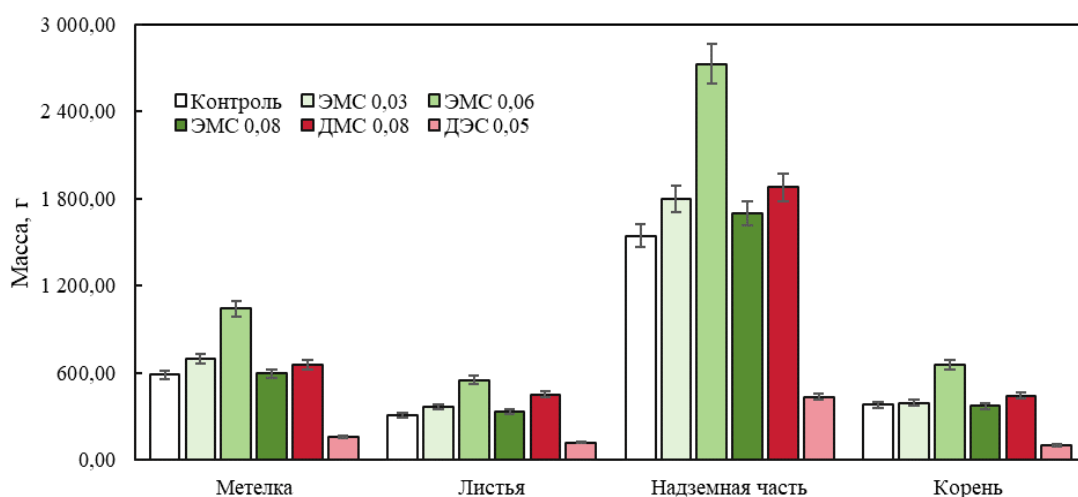


Рисунок 7. Влияние химических мутагенов на массу метелки, листьев, надземной части и корня М1 зернового амаранта, г

Методология скрининга и идентификации мутантов зернового амаранта, индуцированных этилметансульфонатом (ЭМС), диметилсульфатом (ДМС) и диэтилсульфатом (ДЭС), основана на классических принципах химического мутагенеза и последующего фенотипического отбора, направленных на расширение генетического разнообразия и получение форм с улучшенной урожайностью, засухоустойчивостью и качеством зерна. Первое мутантное поколение (М1), полученное из обработанных мутагенами семян, характеризуется преимущественно физиологическими и морфологическими нарушениями (снижение всхожести, замедленный рост, хлороз, деформации листьев), поэтому целенаправленный отбор, как правило, не проводят, ограничиваясь индивидуальным выращиванием и фенотипическим контролем растений для сохранения максимального спектра мутаций.



Рисунок 8. Типичные различия у мутантов зернового амаранта второго поколения (M2), обработанных тремя химическими мутагенами (Слева направо: ЭМС, ДМС, ДЭС; Снято в августе 2023 года, экспериментальная площадка ФНЦО)

В нашем исследовании все три химических мутагена снижали потенциал прорастания (ПП) и лабораторную всхожесть (СП) семян амаранта по сравнению с контролем: ПП уменьшался с 88,25% (контроль) до 33–40% при обработке ЭМС, 28% при ЭМС 0,08 мг/мл, 7% при ДМС 0,08 мг/мл и 20% при ДЭС 0,05 мг/мл, тогда как СП снижался с 92,00% до 50–74% (ЭМС), 47% (ЭМС 0,08 мг/мл), 27% (ДМС) и 49% (ДЭС), что отражено в таблице 4.

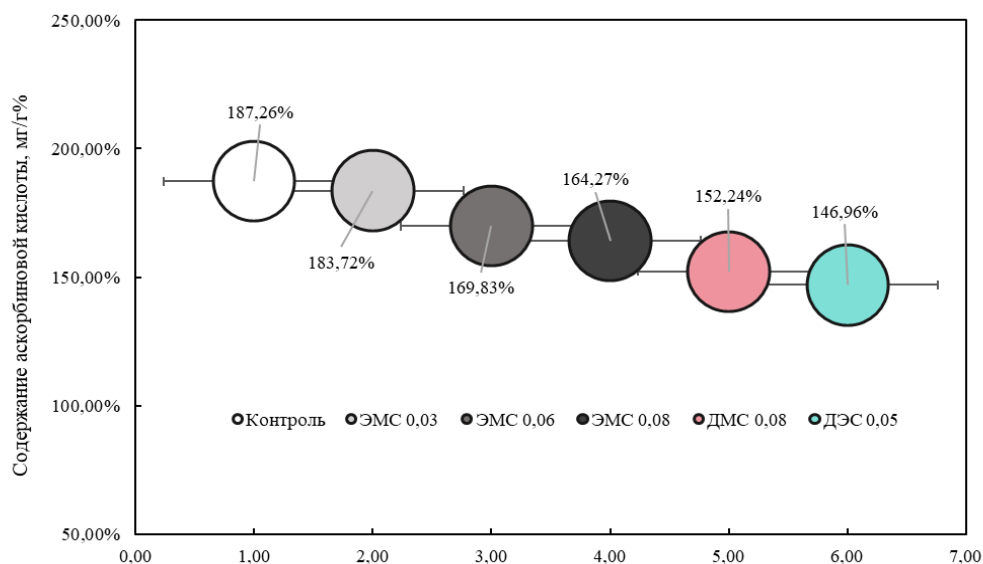


Рисунок 9. Влияние химических мутагенов на содержание аскорбиновой кислоты M2 зернового амаранта в конце вегетации, мг/г%

В результате посева пяти групп семян амаранта поколения M1 (по 100 семян) было получено 255 жизнеспособных растений, тогда как в контроле из 100 семян выжило 95 растений, что указывает на дозозависимое снижение всхожести и жизнеспособности под действием ЭМС, ДМС и ДЭС. Морфологический анализ показал, что в фазу бутонизации у 36,8% растений, обработанных ЭМС (0,03–0,08 мг/мл), формировались антоциановые пятна на листьях и варьировала форма листовых пластинок, а к фазе созревания возрастала пигментация листьев и соцветий, биомасса и зерновая продуктивность. У 32% растений после ДМС (0,08 мг/мл) отмечены аномалии листьев и удлинённые соцветия (70–80 см против 50–60 см в контроле), тогда как ДЭС (0,05 мг/мл) вызывал угнетение роста у 82% растений с уменьшением биомассы, несмотря на укрупнение зерна и изменение окраски соцветий; при этом

обработка ЭМС 0,06 мг/мл наиболее существенно увеличивала массу соцветий, листьев, надземной части и корней (до 73–79% относительно контроля) (Рисунок 7).

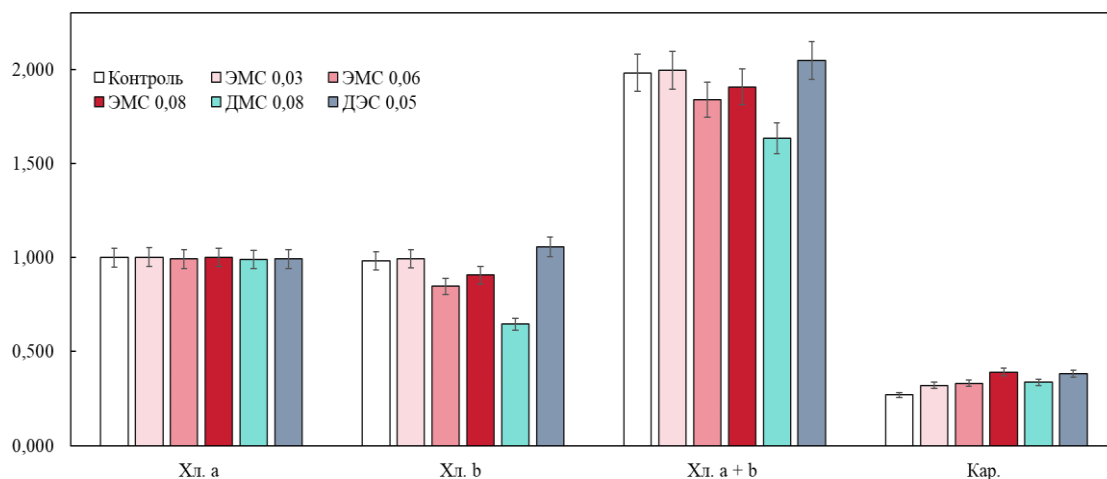


Рисунок 10. Влияние химических мутагенов на содержание фотосинтетических пигментов зернового амаранта М₂ в конце вегетации, мг/г.

Из популяции мутантных растений зернового амаранта поколения М₁ для дальнейшего размножения и анализа было отобрано 19 перспективных образцов, по которым изучали морфологию поколения М₂ (Рисунки 8).

Растения М₂, полученные после обработки ЭМС, формировали более мощные боковые побеги, крупные соцветия, увеличенную высоту, толщину стебля, число листьев и площадь листьев, что сопровождалось ростом общей биомассы до 165,75% относительно контроля, тогда как ДМС и ДЭС также повышали биомассу, но с меньшим эффектом и с сохранением удлинённых соцветий либо без боковых ветвей.

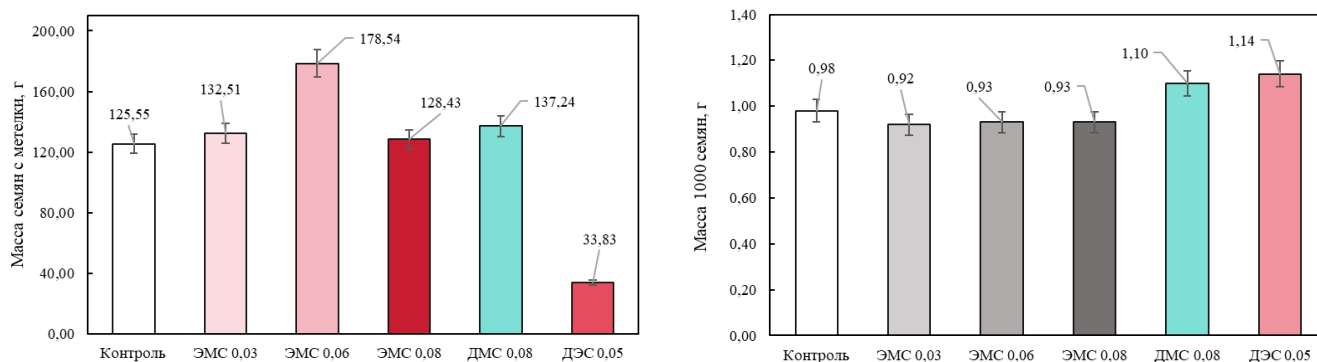


Рисунок 11. Влияние химических мутагенов на массу семян с метелки и массу 1000 семян мутантов поколения М₁ зернового амаранта, г

Во втором поколении мутантов амаранта (М₂), полученных после обработки семян этилметансульфонатом, диметилсульфатом и диэтилсульфатом, выявлено снижение содержания аскорбиновой кислоты в листьях по сравнению с контролем (Рисунок 9). Концентрация аскорбиновой кислоты уменьшалась на 1,89; 9,31; 12,28; 18,70 и 21,52% при обработке ЭМС 0,03; 0,06; 0,08 мг/мл, ДМС 0,08 мг/мл и ДЭС 0,05 мг/мл соответственно, что указывает на дозо- и тип-зависимый эффект химического мутагенеза. Снижение уровня аскорбиновой кислоты у мутантов М₂, вероятно, обусловлено совокупностью генетических и физиолого-биохимических механизмов, включая мутации в генах ферментов её биосинтеза, усиленное потребление аскорбата на детоксикацию активных форм кислорода и возможное угнетение фотосинтеза,

ограничивающее поступление восстановительных эквивалентов и метаболитических предшественников. Полученные данные свидетельствуют о том, что химический мутагенез, с одной стороны, создаёт источник генетической вариабельности для селекции по антиоксидантным признакам, а с другой, может снижать базовый уровень ключевых антиоксидантов, что требует тщательного скрининга мутантных линий по содержанию биоактивных соединений.

Анализ влияния химических мутагенов на содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений зернового амаранта поколения M_2 в конце вегетации показал, что уровень хлорофилла а оставался близким к контролю, тогда как хлорофилл в демонстрировал более выраженную вариабельность (Рисунок 10). У растений, полученных из семян, обработанных ЭМС 0,03 мг/мл и ДЭС 0,05 мг/мл, содержание хлорофилла в превышало контроль на 1,12 и 7,54%, тогда как при ЭМС 0,06 и 0,08 мг/мл и ДМС 0,08 мг/мл оно снижалось на 13,75, 7,74 и 34,32% соответственно. Одновременно предпосевная обработка всеми мутагенами (ЭМС 0,03; 0,06; 0,08 мг/мл, ДМС 0,08 мг/мл, ДЭС 0,05 мг/мл) приводила к достоверному увеличению содержания каротиноидов в листьях M_2 -растений на 18,89; 22,59; 44,81; 24,44 и 41,48% по сравнению с контролем, что может отражать активацию антиоксидантной и фотозащитной функций каротиноидов в ответ на мутаген-индуцированный окислительный стресс.

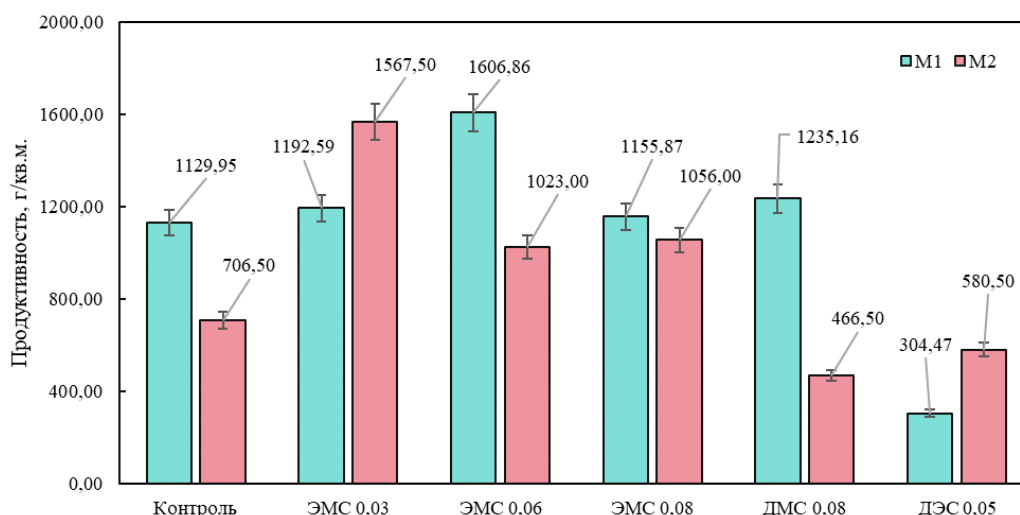


Рисунок 12. Влияние химических мутагенов на продуктивность M_1 и M_2 зернового амаранта, г/кв.м.

Предпосевная обработка семян зернового амаранта химическими мутагенами оказала комбинированное влияние на урожайность растений поколения M_1 . При обработке ЭМС 0,03; 0,06 и 0,08 мг/мл, а также ДМС 0,08 мг/мл масса семян с метелки увеличивалась на 5,54; 42,21; 2,29 и 9,31% по сравнению с контролем, тогда как ДЭС 0,05 мг/мл снижал этот показатель на 73,05% (Рисунок 11). Масса 1000 семян уменьшалась на 6,12–5,10% при всех концентрациях ЭМС, но возрастала на 12,24 и 16,33% после обработки ДМС и ДЭС соответственно, что отражает разную направленность эффекта мутагенов на компоненты урожайности. Учитывая вариабельность признаков, отбор перспективных мутантов для последующего изучения в поколениях M_2 и M_3 проводился с учётом совокупности показателей продуктивности, жизнеспособности и морфофизиологического статуса растений.

На рисунке 12 представлено сравнение урожайности семян амаранта между мутантными растениями поколений M_1 и M_2 . Повышенная продуктивность, индуцированная обработкой ЭМС в концентрациях 0,03, 0,06 и 0,08 мг/мл, сохранялась в поколении M_2 , что свидетельствует об относительной стабильности данного признака. В то же время у мутантов M_2 после обработки ДМС 0,08 мг/мл урожайность снижалась по сравнению с соответствующей группой M_1 и контролем, тогда как у растений M_2 , происходящих из семян, обработанных ДЭС 0,05 мг/мл, отмечено увеличение урожайности на 90,66% относительно M_1 , что указывает на высокую селекционную ценность данного варианта.

Урожайность зернового амаранта в поколении M_3 была выше контроля при предпосевной обработке семян ЭМС 0,03; 0,06; 0,08 мг/мл и ДЭС 0,05 мг/мл: прирост составил 55,22; 27,57; 36,36 и 17,38% соответственно, тогда как ДМС 0,08 мг/мл не обеспечивал повышения продуктивности (Рисунок 13). Повышение урожайности у вариантов ЭМС и ДЭС, вероятно, связано с накоплением благоприятных точечных мутаций, затрагивающих гены, контролирующие элементы структуры урожая (число соцветий, зерен, биомассу), а также фотосинтез и распределение ассимилятов, тогда как высокая мутагенная нагрузка ДМС могла сопровождаться отрицательными физиологическими эффектами, ограничивающими реализацию продуктивного потенциала мутантов M_3 .

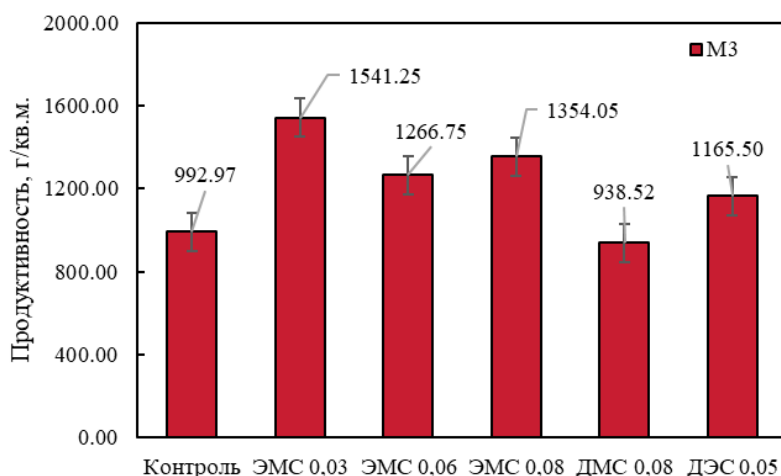


Рисунок 13. Влияние химических мутагенов на продуктивность M_3 зернового амаранта, г/кв. м

Перспективы использования зернового амаранта под действием химических мутагенов связаны с целенаправленным расширением его генетического разнообразия и повышением засухоустойчивости. Род *Amaranthus* уже известен высоким адаптационным потенциалом к водному дефициту и способностью накапливать фенольные соединения, флавоноиды и антиоксиданты при засухе, что подтверждено для *A. tricolor* L. и других форм овощного амаранта. Химический мутагенез (ЭМС, ДМС, ДЭС) в сочетании с многоэтапным фенотипическим скринингом, физиологическими тестами (ОСВ, пигменты, антиоксидантные ферменты) и молекулярно-генетическим анализом (NGS, qRT-PCR, поиск мутаций в генах DREB, NAC, аквапоринах и ферментах синтеза осмопротекторов) позволяет выделять линии с устойчивым поддержанием продуктивности и усиленной антиоксидантной защитой в условиях засухи. Интеграция этих данных создаёт основу для выведения новых

сортов зернового амаранта, пригодных для возделывания в аридных и полуаридных регионах как источника высокобелкового и антиоксидантно богатого растительного сырья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования подтвердили возможность адаптации зернового амаранта к условиям умеренно континентального климата Центральной России при использовании регуляторов роста и химического мутагенеза.

В условиях низкотемпературного стресса (4–10 °С) предпосевная обработка семян амаранта гибберелловой и янтарной кислотами повышала потенциал прорастания, индексы жизнеспособности и энергии семян, а также увеличивала длину гипокотыля и корня по сравнению с контролем. Хлорид кальция и салициловая кислота способствовали росту биомассы и повышению содержания фотосинтетических пигментов и антиоксидантов относительно необработанных семян.

В полевых условиях Московской области обработка семян аскорбиновой кислотой (60 мг/л), хлоридом кальция (3000 мг/л) и препаратом Альбит (1 г/л) обеспечивала достоверное увеличение урожайности на 29–40 % по сравнению с контролем. Эти обработки повышали высоту растений, площадь листовой поверхности, массу надземной части и содержание хлорофиллов и каротиноидов.

В условиях водного дефицита перекись водорода (5 ммоль/л) снижала биомассу на 90,1 % и содержание фотосинтетических пигментов почти вдвое по сравнению с контролем, что свидетельствует о её неэффективности в стрессовых условиях. В то же время, аскорбиновая и янтарная кислоты увеличивали высоту растений на 66–75 %, площадь листьев на 85–102 %, надземную массу на 41–75 % и содержание амарантина и аскорбиновой кислоты на 61–88 % по сравнению с контрольной группой, подвергнутой засухе.

Химический мутагенез показал, что обработка ЭМС (0,03–0,08 мг/мл) повышала урожайность мутантов М₃ на 27–55 % по сравнению с контролем. ДЭС (0,05 мг/мл) увеличивал массу 1000 семян на 16,33 %, но снижал общую продуктивность в М₁ на 73,05 %. ДМС (0,08 мг/мл) не обеспечил достоверного прироста урожайности ни в одном поколении.

Таким образом, комбинация предпосевного праймирования и мутагенеза позволяет получать формы амаранта с повышенной продуктивностью, устойчивостью к абиотическим стрессам и улучшенным биохимическим профилем, что открывает перспективы для его внедрения в сельскохозяйственное производство.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

При возделывании амаранта (*A. hypochondriacus* L.) сорта Кизлярец, в условиях Нечерноземной зоны Российской Федерации рекомендуется проводить предпосевную обработку семян аскорбиновой кислотой (60 мг/л), хлоридом кальция (3000 мг/л) или биопрепаратом «Альбит» (1 г/л), что обеспечивает достоверную прибавку урожайности семян на 42,6 %, 41,7 % и 35,2% соответственно по сравнению с контролем и позволяет получать урожайность 4875, 4800 и 4500 кг/га. Для повышения устойчивости растений к абиотическим стрессам в частности, к низким положительным температурам в фазе проростков и к засухе в период активного роста, целесообразно применять салициловую кислоту в концентрации 69 мг/л, которая способствует усилению антиоксидантной защиты, стабилизации водного режима и сохранению фотосинтетической активности, что в совокупности расширяет адаптационный потенциал культуры в условиях изменчивого климата Центральной России.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

База данных Scopus и Web of Science

1. **Feng J.** Seed priming effects on morphological traits of *Amaranthus hypochondriacus* under optimal and low temperatures/ Gins M.S., Gins V.K. // SABRAO Journal of Breeding and Genetics. – 2022. – Vol. 54 (3). – P. 649-658.
2. **Feng J.** Impact of eco-physiological factors on the weed seed germination and emergence: A review on its role in weed management/ Bahran K.Y., Shimendi G.O., Ghebriel O.D., Erikson T.L.M., Meisam Z. // Research on Crops. – 2023. – Vol. 24. – P. 749-758.
3. **Feng J.** The mechanism underlying the hypoglycemic effect of epimedin C on mice with type 2 diabetes mellitus based on proteomic analysis/ Zhou X., Liu Z., Yang X., Feng J., Gins M.S., Yan T., Han L., Zhang H. // Nutrients. – 2024. – Vol. 16(25). – P. 1-18.
4. **Feng J.** Protective effects and mechanism of polysaccharides from edible medicinal plants in alcoholic liver injury: A review/ Su Z.W., Yan T.Y., Feng J., Zhang M.Y., Han L., Zhang H.F., Xiao Y. // International Journal of Molecular Sciences. – 2023. – Vol. 24 (16530). – P. 1-18.
5. **Feng J.** Chemical structure, hypoglycemic activity, and mechanism of action of selenium polysaccharides/ Duan W., Yang X., Zhang H., Zhang M. // Biological Trace Element Research. – 2022. – Vol. 200 (10). – P. 4404-4418.

Публикации в других изданиях

6. **Фэн Ц.** Влияние обработки стимуляторами роста на всхожесть семян амаранта (*Amaranthus hypochondriacus* L.)/ Гинс М.С., Гинс В.К. // В книге: Инновационные процессы в сельском хозяйстве. Сборник тезисов XIV Международной научно-практической конференции. Москва. – 2022. – С. 173-177.
7. **Фэн Ц.** Влияние обработки семян стимуляторами роста на морфологические параметры проростков капусты китайской (*Brassica chinensis* L.) и амаранта (*Amaranthus hypochondriacus* L.) Гинс М.С., Бондарева Л.Л., Гинс В.К. // Биоразнообразие Экосистем Бассейна Днестра. Материалы Республиканской научно-практической конференции (с международным участием). Тирасполь. – 2022. – С. 105-107.

8. **Фэн Ц.** Использование регуляторов роста для повышения качества семян и жизнеспособности проростков *Amaranthus hypochondriacus* L./ Гинс М.С., Гинс В.К. // В сборнике: Приоритетные научные исследования в области производства и переработки плодоовощного сырья и винограда. Сборник научных трудов международной научно-практической конференции. Махачкала. – 2023. – С. 148-154.

9. **Фэн Ц.** Формирование адаптационного потенциала водяного кресса (*Nasturtium officinale* R.BR) в защитном грунте/ Ахраров М. А., Гинс М. С., Гинс В.К. // В сборнике: Приоритетные научные исследования в области производства и переработки плодоовощного сырья и винограда. Сборник научных трудов международной научно-практической конференции. Махачкала. – 2023. – С. 154-158.

10. **Фэн Ц.** Влияние предпосевной обработки гибберелловой и салициловой кислотами на содержание аскорбиновой кислоты в проростках *Amaranthus hypochondriacus* L. сорта Крепыш/ Гинс М.С., Гинс В.К. // В сборнике: Международной научно-практической конференции «Ароматические, лекарственные и овощные растения: интродукция, селекция, агротехника, биологически активные вещества, влияние на человека» Ялта. – 2023. – С. 71.

11. **Фэн Ц.** Посевные качества семян амаранта сорта Валентина/ Павлов Л.В., Гинс М.С., Гинс В.К. // В сборнике: Международной научно-практической конференции «Ароматические, лекарственные и овощные растения: интродукция, селекция, агротехника, биологически активные вещества, влияние на человека» Ялта. – 2023. – С. 50.

12. **Фэн Ц.** Действие обработки семян регуляторов роста на продуктивность и содержание антиоксидантов *Chrysanthemum coronarium* L. / Тчуда Л.М.Э., Романова Е.В., Лаврова З.И., Гинс М.С. // В сборнике: Международной научно-практической конференции «Ароматические, лекарственные и овощные растения: интродукция, селекция, агротехника, биологически активные вещества, влияние на человека» Ялта. – 2023. – С. 66.

Аннотация

Действие регуляторов роста на физиолого-биохимические показатели и урожайность зернового амаранта в оптимальных условиях и при стрессе

Диссертация посвящена исследованию влияния регуляторов роста (гиббереллиновая кислота, янтарная кислота, салициловая кислота, аскорбиновая кислота, перекись водорода, хлорид кальция и Альбит) и химических мутагенов (этилметансульфонат, диметилсульфат и диэтилсульфат) в процессе предпосевной обработки на всхожесть, параметры прорастания, морфологические характеристики, содержание антиоксидантов, содержание фотосинтетических пигментов и урожайность зернового амаранта (*Amaranthus hypochondriacus* L.). Предварительно выяснен принцип и механизм действия нескольких регуляторов роста на рост и развитие зернового амаранта. Кроме того, был изучен механизм применения регулятора роста в качестве предпосевной обработки семян для повышения устойчивости растений зернового амаранта к основным абиотическим стрессам, влияющим на рост растений в Московском регионе (таким как водный дефицит (засуха) и низкая положительная температура). С помощью химического мутагенеза был получен относительно стабильный мутант зернового амаранта третьего

поколения с генетической формой, обладающий такими характеристиками, как увеличенная биологическая масса, повышенный урожай, увеличенная масса 1000 семян и повышенная устойчивость к стрессу.

Abstract

Effect of growth regulators on physiological and biochemical parameters and yield of grain amaranth under optimal and stress conditions

The dissertation is devoted to investigating the effect of growth regulators (gibberellic acid, succinic acid, salicylic acid, ascorbic acid, hydrogen peroxide, calcium chloride, and Albit) and chemical mutagens (ethyl methanesulfonate, dimethyl sulfate, and diethyl sulfate) applied as pre-sowing seed treatments on germination capacity, germination parameters, morphological characteristics, antioxidant content, photosynthetic pigment content, and grain yield of grain amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.). The principle and mechanism of action of several growth regulators on the growth and development of grain amaranth were preliminarily established. In addition, the mechanism of using growth regulators via pre-sowing seed treatment to enhance the tolerance of grain amaranth plants to the main abiotic stresses affecting plant growth in the Moscow region (such as water deficit (drought) and low positive temperatures) was studied. Using chemical mutagenesis, a relatively stable third-generation mutant of grain amaranth with a stable genetic constitution was obtained, characterized by increased biomass, higher grain yield, increased 1000-seed weight, and enhanced stress tolerance.